

PENENTUAN SIFAT-SIFAT MEKANIS LASER COATINGS DAN LASER SURFACE ALLOYS DENGAN METODE MIKROINDENTASI HERTZ

Viktor Malau *)

ABSTRACT

Mechanical properties of surface layers (laser coatings and laser surface alloys) have been investigated by Hertzian microindentation method, whereby a hard spherical indenter is pressed into the solid specimen surface. With this method, elastic and elastoplastic depth of indenter penetration are measured as a function of load. This approach enables determining not only of hardness but also of elastic modulus and yielding stress of the specimen surface.

These devices have very high sensitivity, which allow an investigation of the mechanical properties of surface layers as small as several micrometers thickness. This method was applied to estimate the elastic modulus and yielding stress of laser coatings and laser surface alloys with 0,1 mm to 1,0 mm thickness.

PENDAHULUAN

Para perencana pada industri otomotif maupun aeronautik sering menghadapi permasalahan yang menyangkut pemilihan bahan logam yang akan digunakan menjadi komponen dasar suatu konstruksi. Bahan yang dipilih harus memiliki syarat-syarat tertentu, misalnya: cukup kuat, tahan terhadap keausan atau tahan terhadap korosi dan lain-lain. Untuk dapat memenuhi kriteria ini, bahan yang dipilih haruslah mempunyai kualitas tinggi dipandang dari sudut ilmu logam. Penggunaan logam berkualitas tinggi tentu saja akan menaikkan biaya / harga jual suatu mesin atau peralatan. Hal ini dapat berakibat bahwa perusahaan tersebut kurang mampu bersaing dengan perusahaan sejenis di pasaran. Dengan demikian penggunaan bahan berkualitas tinggi, secara ekonomis, tidak senantiasa menguntungkan.

Atas dasar pertimbangan tersebut, para perencana berupaya menggunakan bahan dasar dari logam berkualitas sedang (harga lebih murah), tetapi dengan perlakuan khusus pada permukaannya. Dengan perlakuan ini, permukaan logam dapat memiliki sifat-sifat fisis dan mekanis lebih baik dari logam dasarnya, bahkan dapat lebih baik dari logam berkualitas tinggi. Perlakuan khusus tersebut dapat berupa perlakuan panas (*heat treatment*), pelapisan permukaan (*coating*) atau berupa paduan permukaan (*surface alloy*).

Ada banyak metode perlakuan khusus yang dapat dijumpai di lapangan. Akhir-akhir ini metode perlakuan khusus dengan bantuan sinar laser sedang berkembang dalam industri khususnya industri

otomotif dan aeronautik. Untuk mendapatkan *laser coating* dan *laser surface alloy* diperlukan bahan tambah dari luar, dan pemilihan bahan tambah ini tergantung pada sifat-sifat akhir permukaan yang dikehendaki. Secara umum, ada tiga tujuan utama yang ingin dicapai sehubungan dengan perlakuan khusus terhadap permukaan suatu elemen:

- a. Meningkatkan sifat-sifat mekanis permukaan,
- b. Meningkatkan sifat-sifat mekanis dan daya tahan permukaan terhadap keausan,
- c. Meningkatkan sifat-sifat mekanis dan daya tahan permukaan terhadap korosi.

Dalam pustaka dapat ditemukan adanya beberapa penelitian untuk menentukan sifat-sifat mekanis suatu lapisan permukaan. Tetapi sejauh ini belum ditemukan metode baku dan reproduktif yang dapat digunakan untuk menentukan sifat-sifat (khususnya modulus elastis dan tegangan batas elastis) suatu lapisan permukaan yang memiliki sifat-sifat berbeda dari logam dasarnya.

Penelitian ini bertujuan untuk menentukan sifat-sifat mekanis seperti modulus elastis, tegangan batas elastis (*yielding stress*) dan kekerasan dari *laser coatings* dan *laser surface alloys* yang diperoleh dengan bantuan sinar laser dengan metode sel mikroindentasi Hertz. Tulisan ini hanya membicarakan sifat-sifat mekanis permukaan sedangkan sifat-sifat lain dan proses pelapisan permukaan dengan bantuan sinar laser tidak akan dibahas pada tulisan ini.

*) Dr. Ir. Viktor Malau, DEA, Dosen Jurusan Teknik Mesin FT. UGM

TINJAUAN PUSTAKA

Penelitian Yang Telah Dilakukan

Lubkin (1972), Johnson (1985) dan Arteaga (1993) menyebutkan beberapa metode yang dapat digunakan untuk mengetahui kekerasan permukaan suatu bahan, misalnya: kekerasan Vickers, Brinell, Knoop, Berkovith, Rockwell dan lain-lain. Loubet (1986) dengan metode mikroindentasi Vickers (indenter berupa piramida intan), sedangkan Finkin (1972), Field (1993) dan Dai (1995) dengan indenter berupa bola baja telah melakukan penelitian untuk menentukan modulus elastis suatu lapisan permukaan benda uji. Analisis yang mereka lakukan terutama didasarkan pada sifat-sifat plastis lapisan permukaan benda uji dan hasil yang diperoleh belum memuaskan dan reproduktif.

Dalam studi ini, penulis menerapkan metode mikroindentasi Hertz untuk memperkirakan sifat-sifat mekanis dari *laser coatings* dan *laser surface alloys*. Metode ini didasarkan pada teori Hertz pada saat pembebanan masih berada dalam daerah elastis dan elastoplastis suatu bahan. Mikroindentasi Hertz ini dapat digunakan untuk memperkirakan modulus dan tegangan batas elastis suatu benda uji. Metode ini bersifat lokal (mikro) dan sangat sensitif terhadap perubahan sifat-sifat mekanis permukaan benda uji.

Teori Hertz

Bila suatu indenter sferis ditekan dengan gaya F pada permukaan relatif kecil pada permukaan datar benda uji, permukaan kontak yang terjadi akan bertumpu pada satu titik saja. Jika gaya yang bekerja cukup besar, kontak yang terjadi bukan lagi bertumpu pada satu titik, tetapi membentuk penampang sferis seperti yang diperlihatkan pada Gambar 1. Dalam hal ini indenter dianggap cukup kaku (*rigid*) dibandingkan dengan benda uji. Besarnya defleksi yang timbul pada permukaan benda uji tergantung pada besar beban yang diberikan dan sifat-sifat mekanis dari kedua benda yang saling berkontak. Hertz telah menjabarkan parameter indentasi sebagai fungsi beban dan sifat-sifat mekanis dari kedua benda yang saling kontak. Parameter tersebut meliputi tekanan kontak, defleksi elastis permukaan benda uji (δ) dan radius lingkaran kontak elastis (a). Tidak ada rumus matematis yang diberikan oleh Hertz yang sederhana dan sangat rumit.

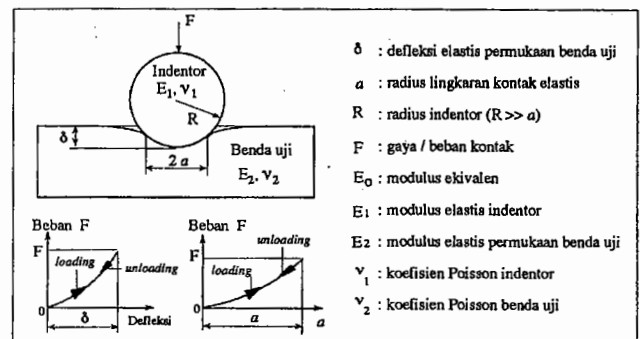
Lubkin (1972) dan Johnson (1985), dengan penyederhanaan terhadap rumusan matematis dari Hertz, menuliskan hubungan antara defleksi elastis permukaan benda uji (δ) dengan radius lingkaran kontak elastis (a) seperti persamaan berikut:

$$\delta = \sqrt[3]{\frac{9}{16} \frac{1}{RE_0^2} F^{2/3}} = \frac{a^2}{R} \quad (1)$$

$$a = \sqrt[3]{\frac{3}{4} \frac{R}{E_0} F^{1/3}} = (\delta R)^{1/2} \quad (2)$$

dengan

$$\frac{1}{E_0} = \frac{1 - \nu_1^2}{E_1} + \frac{1 - \nu_2^2}{E_2} \quad (3)$$



Gambar 1: Parameter indentasi elastis

Analisis dari Lubkin (1972), Johnson (1985) dan Zeng (1992), tentang kontak mekanis antara sebuah indenter bola dengan permukaan datar benda uji, memberi hubungan linier antara tegangan Hertz σ dengan modulus ekuivalen E_0 . Hubungan tersebut dapat diungkapkan dalam bentuk:

$$\sigma = \frac{4}{4\pi} \frac{a}{R} E_0 \quad (4)$$

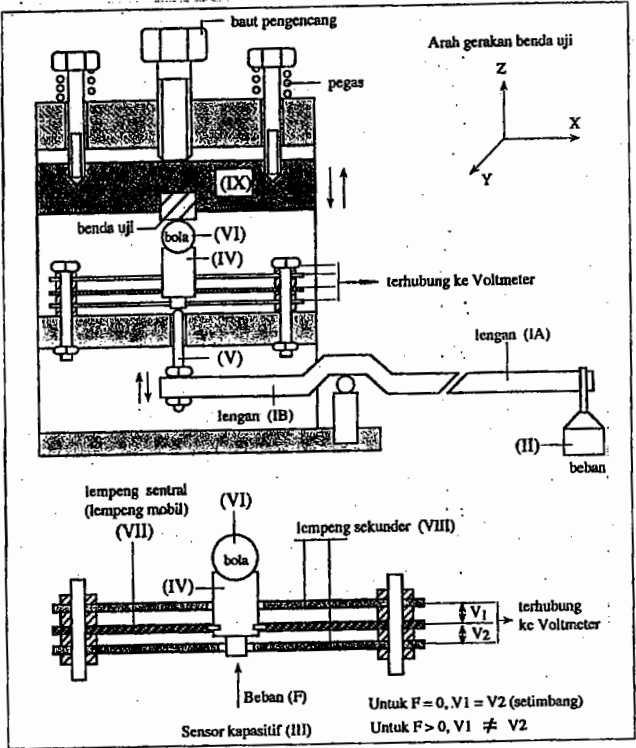
Rumus-rumus Hertz di atas berlaku dengan mengasumsikan bahwa:

- Benda uji homogen atau dianggap homogen: berarti teori ini tidak bisa diterapkan pada benda uji yang mempunyai sub-lapisan dengan sifat mekanis berbeda dengan lapisan di atasnya.
- Ukuran benda uji tak terhingga. Dalam kenyataannya, ukuran benda uji selalu terbatas. Engel (1978) memberi batasan agar teori Hertz ini dapat diterapkan pada benda uji dengan ukuran terbatas maka data pengujian harus berada pada kondisi: $H/a > 2$ dan $R \gg a$ (H : tebal lapisan homogen, a : radius lingkaran kontak elastis dan R : radius indenter).

PELAKSANAAN PENELITIAN

Alat Penelitian

Mesin atau alat penelitian seperti diperlihatkan pada Gambar 2 terdiri dari:



Gambar 2: Skema alat penelitian

- a. Blok kaku (*rigid*) yang diletakkan pada suatu pondasi yang terhindar dari getaran mekanis.
- b. Sistem pembebanan (*loading* dan *unloading*) otomatis pada salah satu ujung lengan (I) yang meliputi:

- Beban (II) yang bervariasi dari 10 sampai 2000 g,
- Motor listrik (tidak tercantum dalam gambar) dengan putaran 60 rpm yang memungkinkan pembebanan secara otomatis dan reproduktif.
- c. Sensor kapasitif (III) yang meliputi:
 - Silinder dari bahan keramik (IV). Bagian atas silinder ini berpenampang konis yang memungkinkan penumpuan indenter keramik (VI) secara sempurna. Indenter keramik ini terbuat dari bahan Si_3N_4 dan berbentuk bola dengan diameter 6,35; 9,5 dan 12,5 mm.
 - Tiga buah lempeng tipis [satu lempeng sentral atau mobil (VII) dan dua lempeng sekunder (VIII)] dari bahan baja dengan ketebalan masing-masing 0,8 mm. Lempeng sentral (VII) terhubung langsung dengan silinder (IV). Ketiga lempeng ini dihubungkan dengan sebuah jembatan Wheatstone yang memungkinkan pengukuran perbedaan tegangan yang timbul akibat gerakan dari lempeng sentral pada saat *loading* dan pada saat *unloading*.
- d. Pemegang benda uji (IX)

Benda uji ditempatkan pada suatu blok kaku yang dilengkapi dengan sebuah baut pengencang. Dengan bantuan baut ini, benda uji dapat bergerak mendekati indenter (VI) sehingga terjadi kontak langsung antara permukaan benda uji dengan indentornya.

Benda Uji

Logam dasar benda uji terbuat dari bahan baja karbon biasa atau paduan aluminium. Pada permukaan logam dasar tersebut terdapat *laser coating* atau *laser surface alloy* yang diperoleh dengan bantuan sinar laser dengan bahan tambah seperti ditunjukkan pada Tabel 1.

Tabel 1: Benda uji berupa *laser coatings* dan *laser surface alloys*

Laser coatings			Laser surface alloys		
Logam dasar	Bahan tambah	Realisasi pembuatan	Logam dasar	Bahan tambah	Realisasi pembuatan
AS7G0.3	Cu-Ni-Fe-Si-B	injeksi serbuk: Cu, Ni, Fe, Si, B	AS7G0.3	Al-Ni-Si	refusi lapisan awal Ni elektrolitik
Baja C-20	Ni-Cr-B-Si	injeksi serbuk: Ni, Cr, B, Si	Baja C-18	Fe-Ni-Cr	refusi lapisan awal Ni dan Cr elektrolitik
Baja C-20	Ni-Cr-B-Si-WC	injeksi serbuk (Ni, Cr, B, Si) +WC			

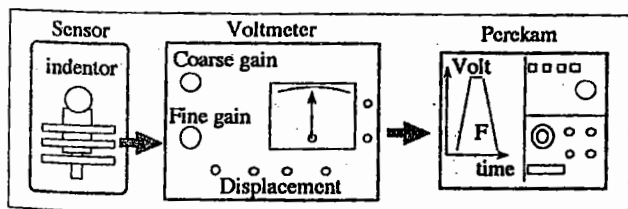
- Sifat-sifat mekanis permukaan dapat ditingkatkan dengan menggunakan bahan tambah berupa komposit logam dengan bahan dasar dari campuran serbuk Cu, Ni, Fe, Si, B atau campuran Al, Ni, Si terhadap logam dasar paduan aluminium.
- Sifat-sifat mekanis dan daya tahan permukaan terhadap keausan dapat ditingkatkan dengan melapisi permukaan dengan campuran serbuk Ni, Cr, B, Si dan WC terhadap logam dasar baja atau paduan tembaga.
- Sifat-sifat mekanis dan daya tahan permukaan terhadap korosi dapat diperbaiki dengan bahan tambah berupa campuran serbuk Ni, Cr terhadap logam dasar baja.

Ukuran serbuk yang digunakan bervariasi dari 10 - 30 μm dengan tebal lapisan dari 0,1 mm sampai 1,0 mm.

Benda uji berukuran: panjang = 10 mm, lebar = 10 mm dan tinggi = 10 mm. Permukaan uji cukup rata dan terhindar dari goresan-goresan dengan kekasaran permukaan bervariasi dari 0,01 sampai 0,75 μm tergantung pada bahan pelapis / bahan tambah yang digunakan.

Cara Percobaan

Langkah pertama yang harus ditempuh pada percobaan ini adalah melakukan kontak langsung tanpa beban antara indenter dan permukaan uji untuk mendapatkan titik kontak referensi. Kemudian diberi beban bervariasi dari 10 sampai 2000 g dan dicatat defleksi yang timbul untuk tiap beban yang diberikan. Simpangan / defleksi lempeng sentral dari sensor kapasitif dapat direkam dengan bantuan sebuah alat perekam (*printer*) setelah terlebih dahulu mendapat penguatan pada Voltmeter seperti ditunjukkan pada Gambar 3. Alat perekam akan mengubah simpangan (mekanis) dari lempeng sentral dalam bentuk tegangan listrik. Suatu hal penting yang perlu diperhatikan adalah penentuan beban batas pada saat terjadi awal plastisitas dari permukaan benda uji.



Gambar 3: Skema prosedur pengukuran

Pengujian dilakukan dengan menggunakan tiga buah indenter bola berdiameter $d = 6,35; 9,5$ dan $12,5$ mm. Masing-masing indenter mempunyai sifat yang sama dengan modulus elastis $E_1 = 310$ GPa, koefisien Poisson $\nu_1 = 0,27$ dan kekerasan Vickers $HV = 1500$.

Untuk validasi hasil pengukuran, pengujian terlebih dahulu dilakukan terhadap bahan referensi dengan sifat-sifat mekanis yang telah diketahui lewat uji tarik konvensional. Bahan referensi terdiri dari paduan aluminium (AU4G), bronze (UE9P), baja chrome (32CDV13) dan keramik (Al_2O_3). Tabel 2 memperlihatkan sifat-sifat bahan referensi yang digunakan dan harga C_0 pada tabel ini diperoleh lewat pengujian mikroindentasi Hertz.

Tabel 2: Sifat-sifat bahan referensi (Johnson, 1985)

Bahan referensi	AU4G	UE9P	32CDV13	Al_2O_3
E_2 (GPa)	70	110	212	310
ν_2	0,33	0,33	0,33	0,27
E_0 (GPa)	63,62	90,16	139,01	170,50
C_0 (mV/N)	12,07	8,51	5,52	4,48

HASIL PENELITIAN

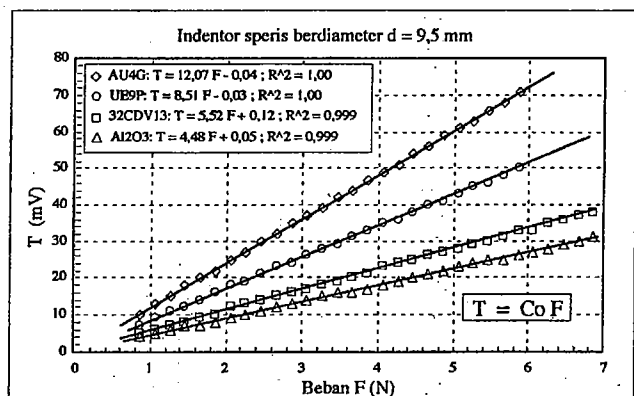
Modulus Elastis

Gambar 4 memperlihatkan tegangan listrik terekam T (mV) sebagai fungsi dari beban yang diberikan F (N) untuk empat bahan referensi. Gambar tersebut menunjukkan bahwa T proporsional dengan beban F . Dengan suatu regresi linier, hubungan antara T dan F dapat ditulis dalam bentuk:

$$T = C_0 F \quad (5)$$

C_0 merupakan suatu konstanta bahan yang besarnya tergantung pada E_1 , E_2 , ν_1 , ν_2 dan R . Data E_0 pada Tabel 2 dapat dinyatakan sebagai fungsi dari C_0 dan persamaan matematisnya dapat dituliskan dalam bentuk:

$$E_0 = 767,5 \frac{1}{C_0} \quad (6)$$



Gambar 4: Tegangan T (mV) sebagai fungsi beban F (N)

Persamaan (6) menunjukkan bahwa modulus ekivalen E_o berbanding terbalik dengan koefisien C_o . Modulus elastis benda uji (E_2) dapat dihitung berdasarkan persamaan (3) yang dapat dituliskan dalam bentuk

$$E_2 = \frac{E_1 - E_o(1 - \nu_2^2)}{E_1 - (1 - \nu_1^2)E_o} \quad (7)$$

Dengan substitusi harga modulus elastis E_1 dan koefisien Poisson ν_1 dari indenter ($E_1 = 310$ GPa, $\nu_1 = 0,27$), persamaan (7) berubah menjadi:

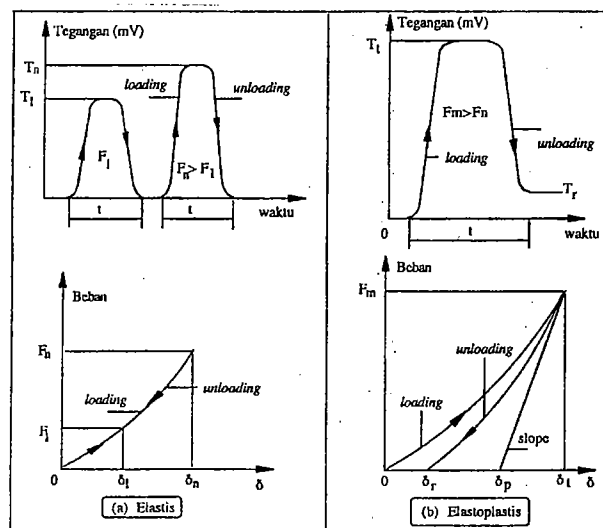
$$E_2 = 767,5(1 - \nu_2^2) \frac{1}{(C_o - 2,3)} \quad (8)$$

Koefisien Poisson ν_2 biasanya bervariasi dari 0,25 sampai 0,33 untuk bahan logam maupun logam paduan. Dalam penelitian ini, untuk kebanyakan benda uji, diambil $\nu_2 = 0,3$. Bila C_o suatu benda uji diketahui (berdasarkan percobaan), maka modulus elastis permukaan (E_2) dapat dihitung dengan persamaan (8) di atas.

Tegangan Batas Elastis

Gambar 5 memperlihatkan kurva-kurva tegangan terekam T vs (F, t) dan beban F vs δ untuk daerah elastis dan elastoplastis suatu bahan. Dalam daerah elastis, setelah *unloading*, defleksi (δ) dan radius lingkaran kontak (a) adalah nol (kembali ke posisi awal), sedangkan dalam daerah elastoplastis terdapat defleksi permanen δ_r dan radius lingkaran kontak permanen a_r . Beban yang diperlukan (F_{lim}) pada saat bahan mulai memasuki daerah elastoplastis

berhubungan erat dengan tegangan batas elastis (σ_y) yaitu pada saat δ_r dan atau a_r mempunyai nilai terukur.



Gambar 5: Kurva tegangan T vs (F, t) dan F vs δ

Persamaan (2) dapat diungkapkan dalam bentuk:

$$F = \frac{4 E_o}{3 R} a^3$$

Untuk bahan homogen, harga $\frac{4 E_o}{3 R}$ adalah konstan.

Jika diambil $\frac{4 E_o}{3 R} = A$, maka dapat ditulis:

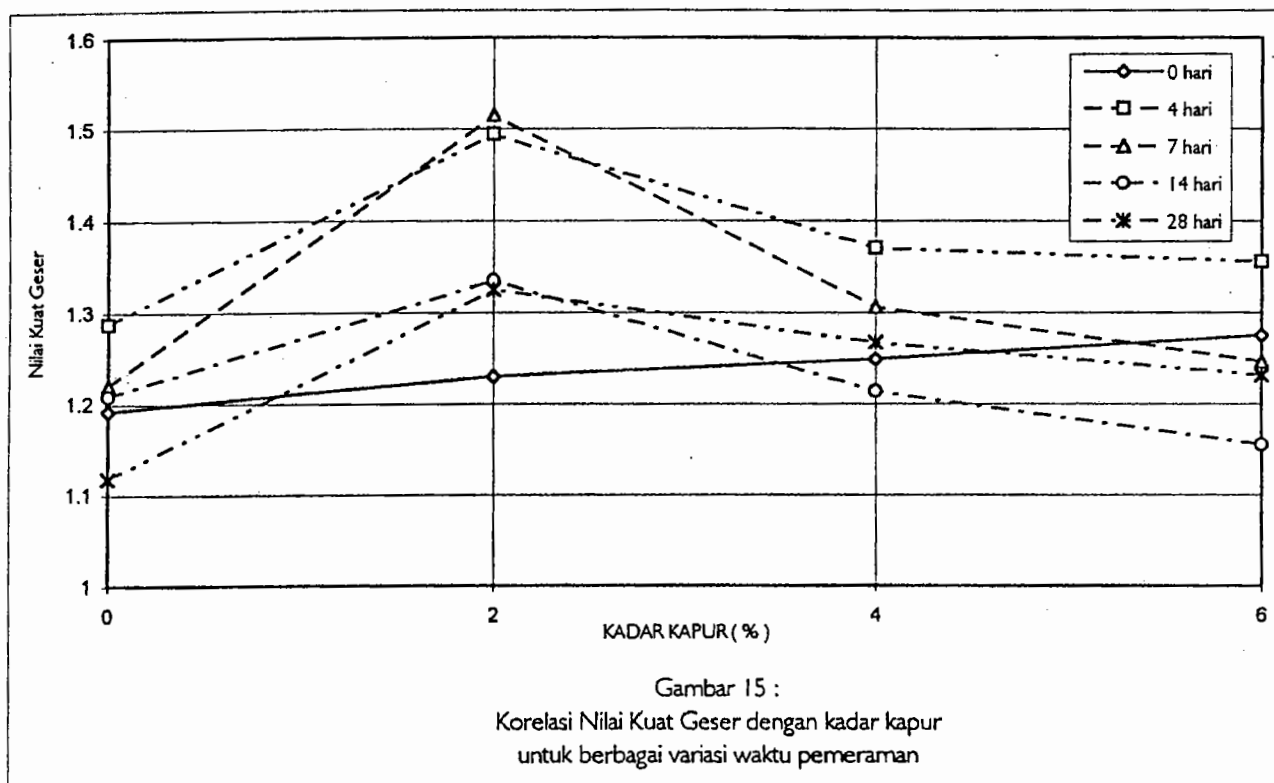
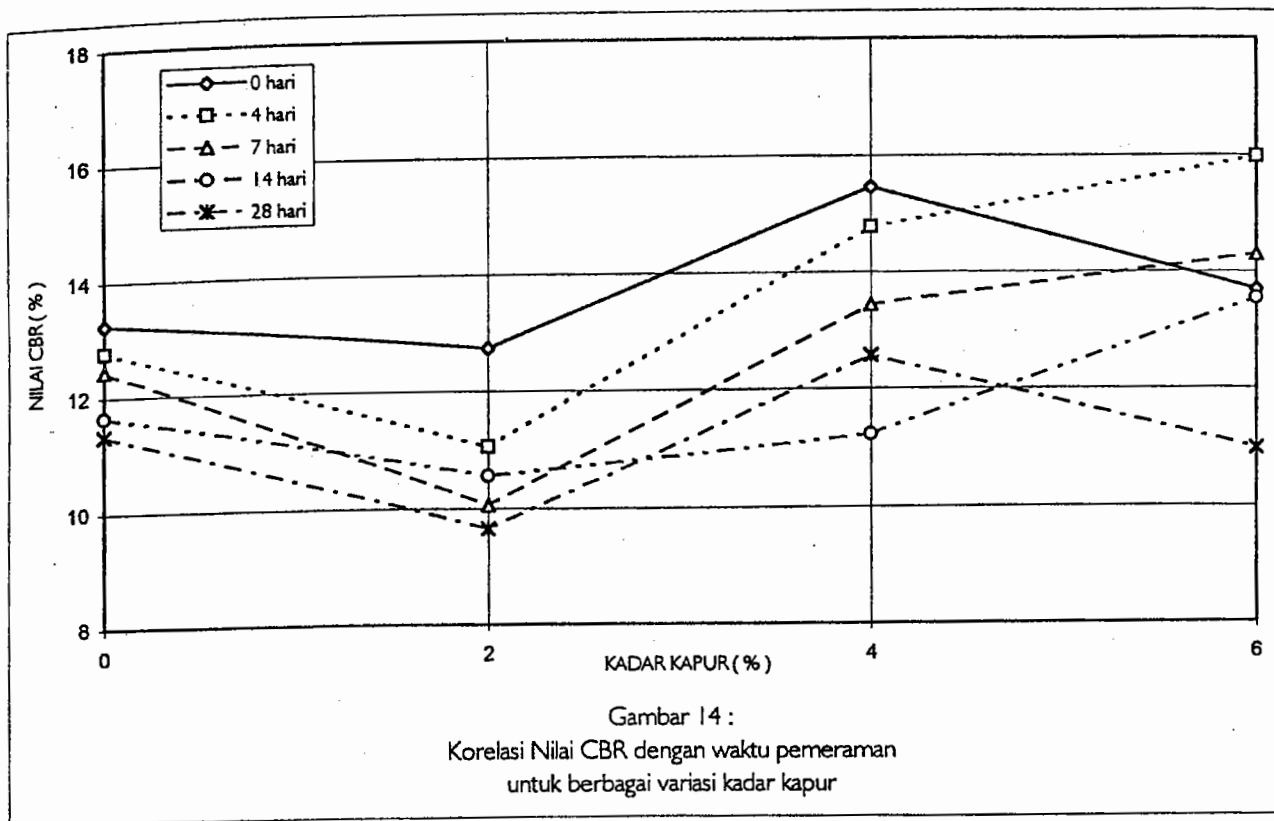
$$F = A a^3 \quad (9)$$

Gambar 6 memperlihatkan hubungan beban F vs a^3 . Gambar ini menunjukkan bahwa sampai harga F_{lim} , hubungan F vs a^3 bersifat linier dengan kemiringan A dan setelah itu terdapat perubahan sifat dengan munculnya kemiringan B yang memberi indikasi bahwa pembebanan sudah memasuki daerah elastoplastis permukaan uji. Dapat dituliskan bahwa:

$$A = \frac{F_{lim}}{a_{lim}^3} = \frac{4 E_o}{3 R}$$

atau

$$E_o = \frac{3R}{4} A = \frac{3R}{4} \frac{F_{lim}}{a_{lim}^3} \quad (10)$$



KESIMPULAN

- a. Sifat ekspansive tanah menurun dengan bertambahnya kadar kapur.
- b. Nilai IP menurun dengan bertambahnya kadar kapur.
- c. Nilai kepadatan menurun bersamaan dengan bertambahnya kadar kapur dan waktu pemeraman.
- d. Kadar kapur naik dari 4% sampai dengan 6 % menyebabkan nilai CBR naik, namun makin lama pemeraman nilai CBR makin turun.
- e. Makin bertambah kadar kapur, makin turun nilai qu.
- f. Kadar kapur 2 % sampai dengan 4 % akan mempengaruhi nilai kuat geser tanah, sedangkan lama pemeraman berkisar antara 4 hari sampai dengan 7 hari.

UCAPAN TERIMA KASIH

Dalam kesempatan ini peneliti mengucapkan terima kasih kepada Pimpinan Fakultas Teknik UGM dan Ketua Lembaga Penelitian UGM atas biaya yang diberikan melalui DPP-UGM tahun anggaran 1996/1997.

DAFTAR PUSTAKA

Bell, F.G., 1993, *Engineering Treatment of Soils*, E & FN SPON an Imprint of Chapman & Hall, London.

- Chen, F.H., 1975, *Foundation on Expansive Soils*, Elsevier Scientific Publishing Company, New York.
- Holtz, W.G. and Gibbs, J.J., 1956, *Engineering Properties of Expansive Clays*, ASCE Transactions Paper No. 2814, Vol. 121.
- Ingles, O.G., 1972, *Soil Stabilization*, Butterworths Pty. Limited, Australia.
- Munirwansyah, 1989, Studi Pengaruh Swelling Pressure dan Uplift Force dalam Percobaan Model Fondasi Tiang pada Tanah Expansive, *Tesis*, Bandung.
- Seed, H.B., Woodward, R.J., Lundgren, R., 1964, Clay Mineralogical Aspects of The Atterberg Limits, *Journal of the Soil Mechanics and Foundation Division*, ASCE, vol90, No.SM 4, July 1964.
- Suhardjito P, 1989, *Teknik Fondasi*, Lab. Geoteknik PAU-ITB, Bandung.
- Supriyono, 1994, *Karakteristik Swelling Tanah Lempung Expansive dengan Batas-batas Atterberg menggunakan Geonor Swelling Test*, PAU Ilmu Teknik UGM, Yogyakarta.
- Supriyono, 1995, Tekanan Pengembangan untuk Tanah Tak Terusik Khususnya Pada Tanah Expansive, *Majalah Media Teknik FT UGM*, No. 3 Tahun XVII Edisi Desember 1995, Hal. 55, Yogyakarta.